

ORIGINAL ARTICLE

세척법에 따른 석재 표면 변화 양상 비교 연구

고가영* · 고민서¹⁾

명지대학교 문화유산보존관리학과, ¹⁾중앙대학교 문화재학과

Comparative Study on Surface Alteration Patterns of Stone Materials by Cleaning Methods

Ga-Young Ko*, Min-Seo Ko¹⁾

Department of Conservation of Cultural Property, Myongji University, Seoul 03674, Korea

¹⁾Department of Cultural Properties, Chung-Ang University, Seoul 06974, Korea

Abstract

This study investigated the surface morphology characteristics of paint-contaminated stone materials after laser and blasting cleaning. Artificial red and black paint contaminants were applied to sandstone, granite, and diorite specimens, and the cleaning results were evaluated by digital microscopy and using three-dimensional surface morphology and colorimetric analyses. Laser cleaning showed relatively high variation and ΔE values in red paint-contaminated granite and diorite specimens, indicating that color and surface morphology changes tended to occur simultaneously. In contrast, blasting cleaning exhibited mixed patterns of increase and decrease in surface height depending on the stone material; the ΔE values remained within a relatively stable range. Correlation analysis revealed a relatively strong positive relationship between ΔE and surface height variation after laser cleaning, whereas no distinct correlation was observed for blasting cleaning. These results suggest that cleaning responses are influenced not only by the cleaning method but also by the optical characteristics of contaminants and physical properties of stone materials. Therefore, both surface morphology and color stability should be considered when selecting appropriate cleaning methods for the conservation of stone cultural heritage.

Key words : Stone cultural heritage, Laser cleaning, Blasting cleaning, 3D surface morphology, Colorimetric analysis, Paint contamination

1. 서 론

국내 국보 및 보물로 지정된 건조물은 총 857건에 이르며, 이 중 석조문화유산은 579건으로 약 67.6%를 차지한다(Cultural Heritage Administration, 2026). 석조문화유산은 화강암, 사암, 섬록암 등 다양한 암석 재질로 구성되어 있으며, 그중 화강암은 국내 석조문화유산에서 가장 높은 비중을 차지하는 대표적인 재질로

확인된다(Jun et al., 2006). 또한 대부분 옥외 환경에 위치하고 있어 수분의 동결-융해, 해수에 기인한 염분, 계절적 기온 변화, 생물 서식 및 환경오염물질 등 다양한 풍화 요인에 지속적으로 노출되고 있으며, 이러한 요인들은 복합적으로 작용하여 석조문화유산의 풍화 현상을 가속화시킨다(Shon, 2010).

최근에는 환경적 풍화 요인 외에도 인위적 훼손 사례가 증가하면서 석조문화유산 오염물 관리의 중요성이

Received 27 March, 2026; Revised 6 July, 2026;

Accepted 28 July, 2026

*Corresponding author : Ga-Young Ko, Department of Conservation of Cultural Property, Myongji University, Seoul 03674, Korea
Phone : +82-53-852-7896
E-mail : koga9921@gmail.com

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

더욱 강조되고 있다. 대표적으로 2023년 경복궁 영추문 담장 훼손 사건과 2025년 광화문 석축 낙서 사건은 모두 화강암 계열 석조문화유산에서 발생한 페인트 낙서 사례로, 보존처리 과정에서는 레이저 세척, 스팀 세척, 블라스팅 세척 등 다양한 세척기법이 적용되었다(Cultural Heritage Administration, 2024). 그러나 페인트 오염물은 일반적인 생물학적 오염물과 달리 석재 표면에 강하게 고착되는 특성을 가지므로, 오염물 제거 과정에서는 제거 효율뿐 아니라 세척에 따른 표면 변화 및 2차 훼손 가능성에 대한 검토가 요구된다(Ko, 2024). 이러한 사례는 인위적 오염물 제거를 위한 신속하고 안정적인 세척기술의 필요성과 함께 세척 이후 나타나는 표면 변화 특성에 대한 연구의 중요성을 보여준다.

현재 국내 석조문화유산 보존처리 현장에서는 페인트 오염물 제거를 위해 레이저 세척과 블라스팅 세척 등의 물리적 세척법과 화학적 작용 물질을 적용한 습포법이 대표적인 표면 세척법으로 활용되고 있다(National Research Institute of Cultural Heritage, 2011a). 이 중 레이저 세척은 오염층과 모재 사이의 레이저 에너지 흡수율 차이를 이용하는 비접촉식 세척기법이며, 블라스팅 세척은 미세 연마재를 이용한 물리적 세척 방식으로 제거 효율이 우수한 것으로 보고되었다(Kim, 2003; Kim et al., 2020).

선행연구에 따르면 레이저 세척은 암석 공극 내부로 침투된 페인트 오염물 제거 과정에서 열적 영향에 따른 표면 변화 가능성이 보고된 바 있으며, 블라스팅 세척 역시 세척 과정에서 물리적 충돌에 따른 표면 변화 가능성이 제기되었다(Kim et al., 2002; Lee et al., 2009). 특히 레이저 세척과 블라스팅 세척은 서로 다른 작용 원리를 가지므로 동일한 오염 조건에서도 상이한 표면 변화가 발생할 수 있음에도 불구하고, 오염물 색상과 석재 재질을 동시에 고려하여 세척 이후 나타나는 표면 형상 변화와 색상 변화를 비교·분석한 연구는 제한적이다.

또한 최근 훼손 사례는 화강암 계열 석조문화유산에서 주로 발생하고 있으나, 국내 석조문화유산은 사암과 섬록암 등 다양한 재질로 구성되어 있어 재질별 세척 특성과 표면 변화 양상에 대한 비교 검토가 필요하다. 기존 연구는 주로 단일 암석 재질 또는 단일 세척기법의 평가에 집중되어 있으며, 오염물과 암석 재질을 동시에 고려하여 레이저 세척과 블라스팅 세척의 표면 변화 특성을 비교한 연구는 부족한 실정이다. 이에 본 연구에서는 사암, 화강암 및 섬록암 시편에 적색 및 흑색 페인트

오염을 인위적으로 조성한 후 레이저 세척과 블라스팅 세척을 동일 조건에서 적용하였다. 특히 디지털현미경 관찰, 3D 표면 형상 분석 및 색상 분석을 연계하여 세척 이후 나타나는 표면 형상 변화와 색상 변화를 종합적으로 비교함으로써, 세척 이후 나타나는 표면 변화 양상과 재질별 특성 비교를 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 연구 재료 및 방법

2.1. 연구 재료

본 연구에서는 시편을 재질 및 오염 유형에 따라 구분하기 위하여 사암(A), 화강암(B), 섬록암(C)으로 구분하고, 각 시편의 오염 유형에 따라 적색은 1, 흑색은 2로 표기하였다(Fig. 1). 레이저 세척용 시편 6개와 블라스팅 세척용 시편 6개를 포함하여 총 12개의 시편을 제작하였으며, 각 조건별 시편은 1개(n=1)로 구성하였다. 시편은 각 5 × 5 cm 크기로 제작하였으며, 실험 전 표면 상태를 일정하게 유지하도록 전처리하였다. 이후 각 시편 표면에 흑색 및 적색 락카 페인트를 각 3회 도포하여 인위적 오염을 형성하였다. 사용된 페인트는 ㈜일신케미칼(IS-2001 계열) 락카 스프레이로, 경복궁 영추문 담장 및 삼전도비 낙서 사례 등 국내 석조문화유산에 발생한 페인트 낙서 유형을 참고하여 선정하였다. 도포된 페인트는 실온에서 약 2주간 자연 경화시켜 실제 야외 오염 조건과 유사한 상태를 구현하고자 하였다.

2.2. 레이저 세척 및 블라스팅 세척 방법

레이저 세척은 비접촉식 펄스 레이저 장비인 P-Laser사의 ECO-V100C (23.8V)를 사용하였다. 실제 세척 조건은 스캔 속도 5,000 mm/s, 반복률(frequency) 60 kHz로 설정하였으며, 흑색 페인트 오염 시편은 약 80% 출력 조건에서 조사하였다. 또한 펄스 지속 시간 200ns, 최대 허용 길이 5로 설정하여 적색 페인트 오염 시편은 흑색 시편에 비해 제거 효율이 낮게 나타나 최대 100% 출력 조건까지 증가시켜 적용하였다. 세척은 오염 부위 전체 면적을 대상으로 1회 조사 방식으로 수행하였다.

블라스팅 세척은 미세 마모를 이용한 물리적 세척 기법으로, IBIX사 Winblaster 9 모델을 사용하였다. 매질은 돌로마이트(80 mesh)를 사용하였으며, 약 3~5 bar의 압력과 수직으로 30 cm의 투사 거리를 기준으

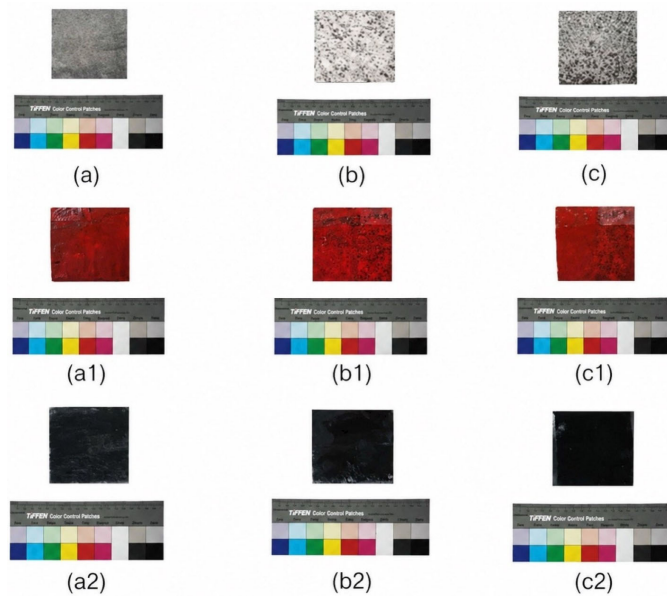


Fig. 1. Stone specimens before and after artificial contamination. (a-c) represent sandstone, granite, and diorite, respectively. (a1-c1) indicate red paint contamination, and (a2-c2) indicate black paint contamination.

로 예비 실험을 통해 적정 분사 조건을 설정한 후, 오염 부위 전체에 2~3초 분사해 각 1회 적용하였다.

2.3. 측정 방법

디지털현미경 분석은 시편의 암석학적 특징과 세척 전·후 표면 상태 변화를 비교하기 위해 실시하였다. 분석에는 Hirox사의 3D 디지털현미경(KH-8700, U.S.A.)을 사용하였으며, MXG-2500 렌즈를 적용하여 $\times 50$ 및 $\times 150$ 배율 조건에서 관찰을 수행하였다. 또한 표면 형상 변화를 정량적으로 확인하기 위해 와이어프레이밍 기반의 3D 형상 분석을 실시하였으며, 촬영 간격(step)은 $450.00\ \mu\text{m}$, 시야 범위는 $1440.0\ \mu\text{m}$, 분해능은 $1.0\ \mu\text{m}$ 조건으로 설정하였다. 본 연구에서는 돌출부 높이를 peak(최고 높이 영역), mid-height(중간 높이 영역), valley(최저 높이 영역)로 구분하여 측정하였으며, 세척 전·후 높이값 변화를 비교하여 증감비율(variation%)을 수식 (1)에 따라 산출하였다.

$$\text{Variation}(\%) = \frac{\text{After} - \text{Before}}{\text{Before}} \times 100 \dots (1)$$

색도 측정은 분광측색계(CM-2600d, Konica Minolta, Japan)를 사용하였으며, 색차(ΔE)는 세척 전·후의 L^* , a^* , b^* 값을 이용하여 수식 (2)에 따라 산출하였다. 시편 표면의 십자선을 기준으로 중앙부를 선정하였으며, 동일 위치에서 3회 반복 측정한 후 평균값으로 세척 전·후 색상 변화를 비교하였다. 색도 변화는 KS A 0063 기준에 따라 CIE L^* , a^* , b^* 표색계와 색차(ΔE^*_{ab})를 활용하여 정량적으로 분석하였으며, 색차 변화의 해석은 미국국립표준기술원(NIST)의 색차 평가 기준을 참고하였다.

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2} \dots (2)$$

색차 변화와 표면 형상 변화의 관계를 검토하기 위하여 각 시편의 peak, mid-height 및 valley variation(%)의 평균값(mean height variation)을 산출하고, ΔE 와의 상관성을 분석하였다. Pearson 상관분석은 수식 (3)에 따라 상관계수(r)와 결정계수(R^2)를 산출하였다.

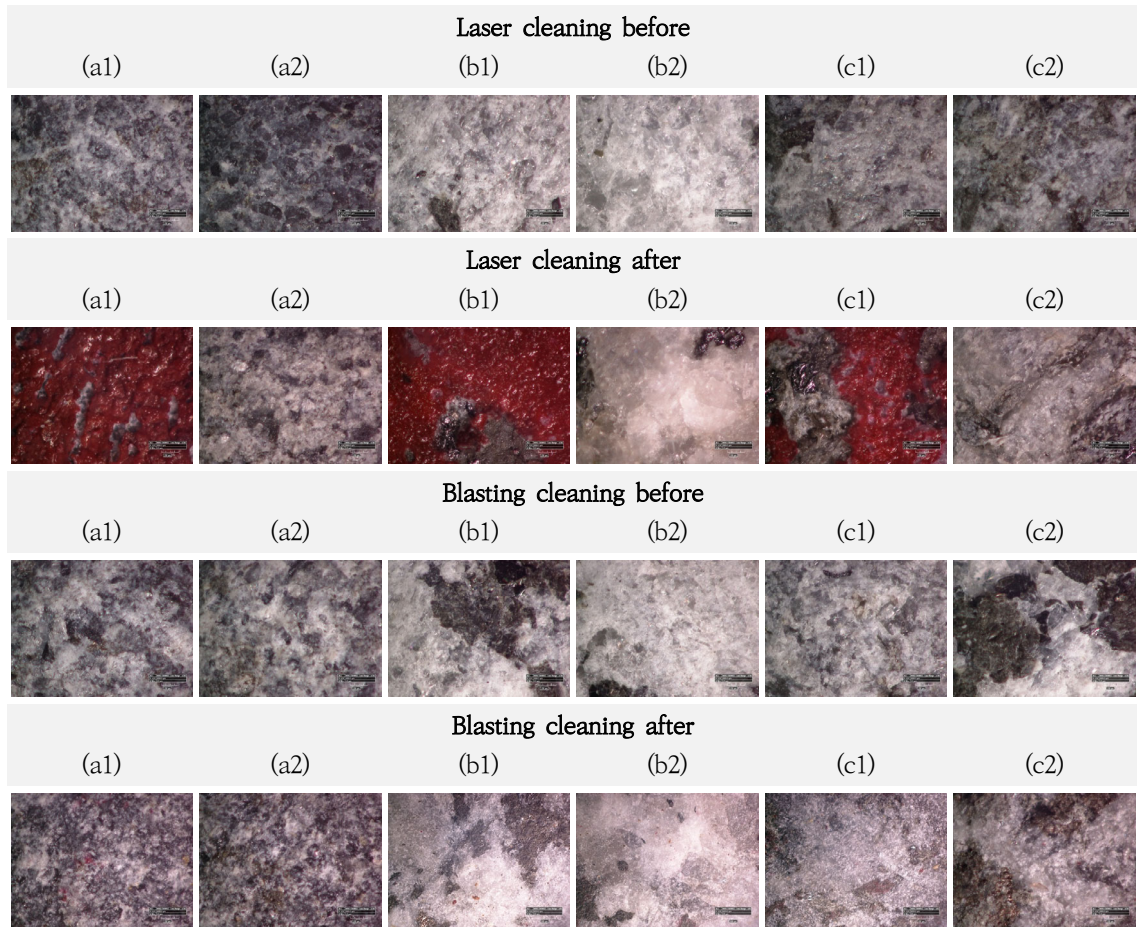


Fig. 2. Digital microscopy images of paint-contaminated samples before and after cleaning.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \dots\dots\dots (3)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 디지털 현미경 관찰 결과

디지털현미경 관찰은 세척 전·후 표면 상태와 잔존 오염물 분포를 시각적으로 확인하기 위한 자료로 활용했으며, 표면 변화 정도에 대한 정량적 평가는 3D 표면 형상 분석 결과를 중심으로 수행하였다. 사암(a), 화강

암(b), 섬록암(c) 시편을 대상으로 실시하였으며, 각 시편은 적색 및 흑색 페인트 오염 시편으로 구분하였다. 세척 전 시편은 가오염 및 세척 공정을 거치지 않은 초기 상태의 표면을 의미하며, 세척 후 시편은 각 세척방법 적용 이후의 표면 상태를 관찰하기 위해 디지털현미경 이미지를 비교하였다(Fig. 2).

레이저 세척 후 표면 관찰 결과, 흑색 페인트 오염 시편(a2, b2, c2)은 전반적으로 오염물 제거 양상이 비교적 뚜렷하게 나타났으며, 세척 이후 표면 형상 변화가 상대적으로 균일하게 관찰되었다. 반면 적색 페인트 오염 시편(a1, b1, c1)의 경우 일부 영역에서 잔존 오염물과 국부적인 표면 변화 양상이 함께 확인되었다. 이는 레이저 세척이 오염층의 광학적 흡수율(absorptivity)

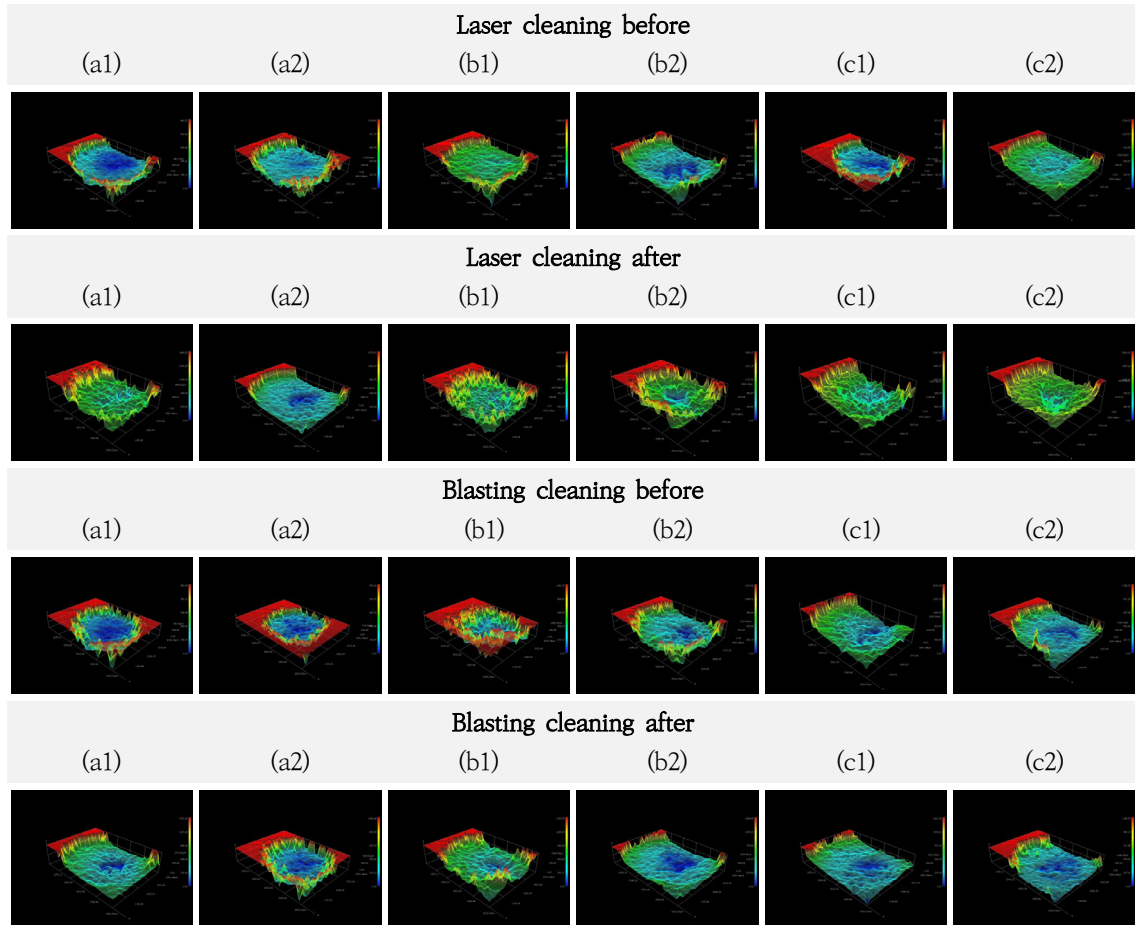


Fig. 3. Wireframe analysis using a 3D digital microscope.

과 반사율(reflectivity)의 차이에 의해 제거 효율이 결정되는 특성을 가진다(Lee, 2001).

특히, 흑색 오염물은 레이저 에너지를 효과적으로 흡수하여 광열 효과가 크게 발생하는 반면, 적색 오염물은 조사된 레이저 에너지의 일부를 반사하여 에너지 흡수율이 감소하기 때문에 판단된다(Kim, 2003).

적색 오염 화강암(b1)과 섬록암(c1)에서는 세척 이후 표면 형상의 변화가 보였으며, 이러한 경향은 이후 수행한 3D 표면 형상 분석 결과와도 유사하게 나타났다. 또한 적색 오염 사암(a1)의 경우 잔존 오염물이 함께 관찰되었으며, 국부적인 표면 변화 양상이 부분적으로 확인되었다.

블라스팅 세척 후 표면에서는 시편별로 서로 다른 변

화 양상이 보였다. 특히 흑색 페인트 오염 사암(a2)에서는 세척 이후 표면 형상의 변화가 나타났으며, 적색 오염 사암(a1)에서는 저부 영역을 중심으로 일부 잔존 오염물이 확인되었다. 또한 흑색 오염 화강암(b2)의 경우에도 일부 영역에서 국부적인 표면 변화 양상이 확인되었다. 이러한 시편별 표면 상태의 차이는 이후 수행한 3D 표면 형상 분석에서도 높이 변화의 증가와 감소 양상으로 확인되었다. 레이저 세척과 블라스팅 세척 과정에서 발생하는 물리적 영향이 암석 재질 및 오염물 상태에 따라 서로 다른 표면 변화 양상으로 나타날 수 있음을 보여주며, 기존 선행연구와도 유사한 경향이 제시되었다(Lee et al., 2009; Kim and Lee, 2018).

Table 1. 3D surface morphology and protrusion height before and after cleaning

No.	Method	Position	Before (μm)	After (μm)	Variation (%)
a1	Laser	Peak	1498	1579	+5.4
		Mid-height	55.5	86.3	+55.5
		Valley	860.5	512.4	-40.5
	Blasting	Peak	1077	1309	+21.5
		Mid-height	612	124.6	-79.6
		Valley	48.5	1.3	-97.3
a2	Laser	Peak	1010.3	1578.6	+56.3
		Mid-height	789.8	909.7	+15.2
		Valley	111.5	218.5	+96
	Blasting	Peak	641.2	1309.1	+104.2
		Mid-height	403.9	806.9	+99.8
		Valley	68.1	139.3	+104.6
b1	Laser	Peak	1000.2	2337.7	+133.7
		Mid-height	553.4	1292.4	+133.5
		Valley	335	659.2	+96.8
	Blasting	Peak	1021.4	1292.5	+26.5
		Mid-height	655.6	746.8	+13.9
		Valley	257.9	27.1	-89.5
b2	Laser	Peak	1635.7	2379.6	+45.5
		Mid-height	908.9	451.1	-50.4
		Valley	186.7	11.72	-93.7
	Blasting	Peak	1353.8	1297.7	-4.1
		Mid-height	583.2	707.1	+21.2
		Valley	51	9.4	-81.6
c1	Laser	Peak	880.9	1957.9	+122.3
		Mid-height	484.7	1061.5	+119
		Valley	145	285.5	+96.9
	Blasting	Peak	1381.9	2471.6	+78.9
		Mid-height	833	1476.3	+77.2
		Valley	179.9	282.1	+56.8
c2	Laser	peak	1920.4	2260.2	+17.7
		Mid-height	1108.7	1358.7	+22.6
		Valley	637.6	352.8	-44.7
	Blasting	Peak	1099.2	1187.1	+8
		Mid-height	636.1	650.2	+2.2
		Valley	30.4	56.7	+86.5

3.2. 3D 현미경 분석 결과 및 고찰

적색 및 흑색 페인트 오염 시편에 대한 3D 표면 형상 분석 결과(Table 1), 세척 전·후 돌출부 높이 변화 양상은 세척방법 및 암석 재질에 따라 상이하게 나타났다. 돌출부 높이 변화는 단순한 수치 증가 또는 감소만으로 해석하기 어려우며, 크게 두 가지 양상으로 구분할 수 있다. 첫 번째는 세척 과정에서 표면 오염층 및 일부 표면층이 제거되면서 돌출부 높이가 감소하는 경우이며, 두 번째는 오염층 제거 이후 기존에 피복되어 있던 석재 본래의 표면 요철 및 입상 조직이 드러나면서 돌출부 높이가 증가하는 경우이다(Ko, 2024). 따라서 돌출부 높이 변화는 표면 형상 변화와 밀접한 관련이 있으나, 단순 수치 비교만으로 판단하기에는 한계가 있으며, 3D 디지털현미경의 와이어프레임 및 표면 형상 이미지를 함께 종합적으로 해석할 필요가 있다.

레이저 세척의 경우 전반적으로 돌출부 높이가 증가하는 경향이 확인되었다. 특히 적색 페인트 오염 화강암(b1)은 peak 133.7%, mid-height 133.5%, valley 96.8% 증가했으며, 적색 페인트 오염 섬록암(c1) 역시 각각 122.3%, 119.0%, 96.9%의 증가율을 나타냈다. 와이어프레임 기반 3D 표면 형상 분석에서도 이러한 변화 양상이 함께 확인되었다(Fig. 3).

반면 일부 시편에서는 돌출부 높이가 감소 양상도 함께 관찰되었다. 적색 페인트 오염 사암(a1)의 경우 valley 값이 40.5% 감소하였으며, 흑색 페인트 오염 화강암(b2)의 mid-height와 valley는 각각 50.4%, 93.7% 감소하였다. 또한 흑색 페인트 오염 섬록암(c2)의 valley 역시 44.7% 감소하였다. 이러한 높이 증가 및 감소 양상은 세척 과정에서 오염층 제거와 함께 기존 표면 요철이 노출되거나 표면 형상이 변화한 결과가 복합적으로 반영된 것으로 판단된다.

블라스팅 세척에서는 레이저 세척과 달리 증가와 감소 양상이 시편별로 혼재되어 나타났다. 특히 흑색 페인트 오염 사암(a2)은 peak 104.2%, mid-height 99.8%, valley 104.6% 증가하여 전체 시편 중 가장 높은 증가율을 보였다. 반면 감소폭이 가장 크게 나타난 시편은 적색 오염 사암(a1)으로, mid-height와 valley 영역에서 각각 79.6%, 97.3% 감소가 확인되었다. 또한 흑색 오염 화강암(b2)의 valley 영역 역시 81.6% 감소하였다.

이러한 높이 변화는 단순한 수치 변화뿐 아니라 세척 과정에서 발생하는 물리적 에너지 전달 방식과 암석 조

질 특성의 영향을 함께 반영하는 것으로 판단된다. 화강암과 섬록암은 마그마가 냉각되어 형성된 치밀한 조직인 반면, 사암은 모래 입자가 퇴적·고결되어 형성된 쇄설성 퇴적암으로 공극이 상대적으로 발달해 있다(National Research Institute of Cultural Heritage, 2011b). 이러한 암석 조직의 차이는 동일한 세척 조건에서도 재질별로 서로 다른 표면 형상 변화 양상을 나타내는 원인 중 하나로 판단된다.

특히, 레이저 세척의 경우 오염물의 광학적 특성에 따라 에너지 흡수율 차이가 발생할 수 있으며, 특히 적색 계열 오염물은 일부 파장을 반사하여 국부적인 열적 영향이 증가할 가능성이 있다(Kim et al., 2002). 반면 블라스팅 세척은 고압 공기와 함께 분사되는 연마재가 표면 오염물을 물리적으로 제거하는 방식으로, 연마재의 충돌 에너지에 의해 세척 효과가 나타난다(Ko, 2024). 따라서 블라스팅 세척에서 관찰된 재질별 표면 형상 변화는 연마재의 물리적 충돌 특성과 암석의 조직 특성이 복합적으로 작용한 결과로 판단된다.

3.3. 색차 분석결과 및 고찰

색차 분석은 시각적으로 인지하기 어려운 표면 색상 변화 정도를 정량적으로 평가할 수 있는 방법으로, 세척 이후 나타나는 표면 변화 특성을 객관적으로 비교하는데 유효한 분석 방법이다(Lee and Wu, 2025). 색차 분석 결과, 세척 방법 및 재질 특성에 따라 표면 색상 변화와 표면 형상 변화 양상이 서로 다르게 나타나는 경향이 확인되었다(Table 2, Fig. 4). 또한 전반적으로 세척 이후 대부분의 시편에서 L^* 값이 증가하는 양상이 나타났는데, 이는 표면에 부착된 페인트 오염물이 제거되면서 명도가 상승한 결과로 해석된다.

레이저 세척에서는 적색 페인트 오염 시편에서 상대적으로 높은 ΔE 값이 나타났다. 적색 오염 화강암(b1)은 ΔE 51.2, 적색 오염 섬록암(c1)은 ΔE 36.3으로 전체 시편 중 비교적 높은 색차값을 보였다. 또한 b1과 c1 시편은 앞서 수행된 3D 표면 형상 분석에서도 평균 variation (%)이 크게 나타난 시편으로 확인되었다. 특히 c1 시편의 경우 세척 이후 a^* 값이 크게 증가하여 적색 계열 변화가 두드러지게 나타났으며, 이는 표면 변화 과정에서 국부적인 색상 변화가 함께 발생하였을 가능성을 시사한다. 반면 흑색 오염 시편(a2, b2, c2)은 적색 오염 시편에 비해 상대적으로 낮은 ΔE 값을 나타냈다.

Table 2. Colorimetric analysis of paint-contaminated stone specimens before and after cleaning

No.	Cleaning method	Test	Colorimetric values			
			L*	a*	b*	ΔE
a1	Laser	Before	55.65	-1.22	-3.77	31.8
		After	56.30	26.25	12.24	
	Blasting	Before	57.74	-1.21	-3.41	14.9
		After	71.89	-1.51	1.26	
a2	Laser	Before	43.70	-1.50	-4.38	39.26
		After	82.91	-1.43	6.37	
	Blasting	Before	55.64	-1.26	-1.69	15.4
		After	70.54	-1.80	2.29	
b1	Laser	Before	72.38	-0.91	-0.45	51.2
		After	51.79	42.04	18.38	
	Blasting	Before	72.09	-0.37	-0.74	24.9
		After	95.42	0.51	7.98	
b2	Laser	Before	76.27	-0.56	-0.52	26.3
		After	99.16	-0.32	12.32	
	Blasting	Before	71.30	-0.94	-1.93	19.2
		After	90.48	-0.90	5.75	
c1	Laser	Before	65.79	-0.93	-0.04	36.3
		After	53.03	30.18	13.59	
	Blasting	Before	62.21	-0.84	0.69	16.9
		After	78.66	-1.28	4.73	
c2	Laser	Before	60.28	-1.09	-0.95	22.5
		After	81.24	-1.25	7.17	
	Blasting	Before	60.21	-1.18	-0.79	21.8
		After	81.07	-1.56	5.48	

레이저 세척 시편을 대상으로 ΔE 와 mean height variation 간의 상관분석 결과, 비교적 높은 양의 상관성이 나타났으며($r=0.845$, $R^2=0.714$), 이는 ΔE 가 증가한 시편에서 표면 높이 변화도 함께 증가하는 경향이 있음을 보여준다. 이러한 결과는 레이저 세척에서 색상 변화와 표면 형상 변화가 동일한 시편에서 함께 나타나는 경향이 있음을 시사한다.

블라스팅 세척은 전반적으로 ΔE 값이 14.9~24.9 범위로 나타나 레이저 세척에 비해 상대적으로 안정적인 색차 변화 양상을 보였다. 특히 적색 오염 사암(a1)은 mid-height와 valley 영역에서 감소가 확인되었음에도 ΔE 값은 14.9로 비교적 낮게 나타났으며, 흑색 오염 화강암(b2) 역시 valley 영역에서 81.6% 감소하였

으나 ΔE 값은 19.2 수준으로 확인되었다. 또한 흑색 오염 사암(a2)은 peak, mid-height, valley 영역에서 모두 약 100% 내외의 증가율을 보였으나, ΔE 값은 15.4 수준으로 비교적 안정적인 범위를 유지하였다. 반면 블라스팅 세척 시편에서는 ΔE 와 mean height variation 간의 상관성이 낮게 나타났으며($r=-0.257$, $R^2=0.066$), 색상 변화와 표면 형상 변화가 반드시 동일한 경향으로 나타나지는 않았다.

종합적으로 색차 분석 결과, 세척 방법 및 재질 특성에 따라 서로 다른 색상 변화 양상이 나타났다. 특히 레이저 세척에서는 적색 오염 시편에서 상대적으로 큰 ΔE 값과 mean height variation이 함께 나타났으며, 상관분석 결과에서도 두 변수 사이에 비교적 높은 양의

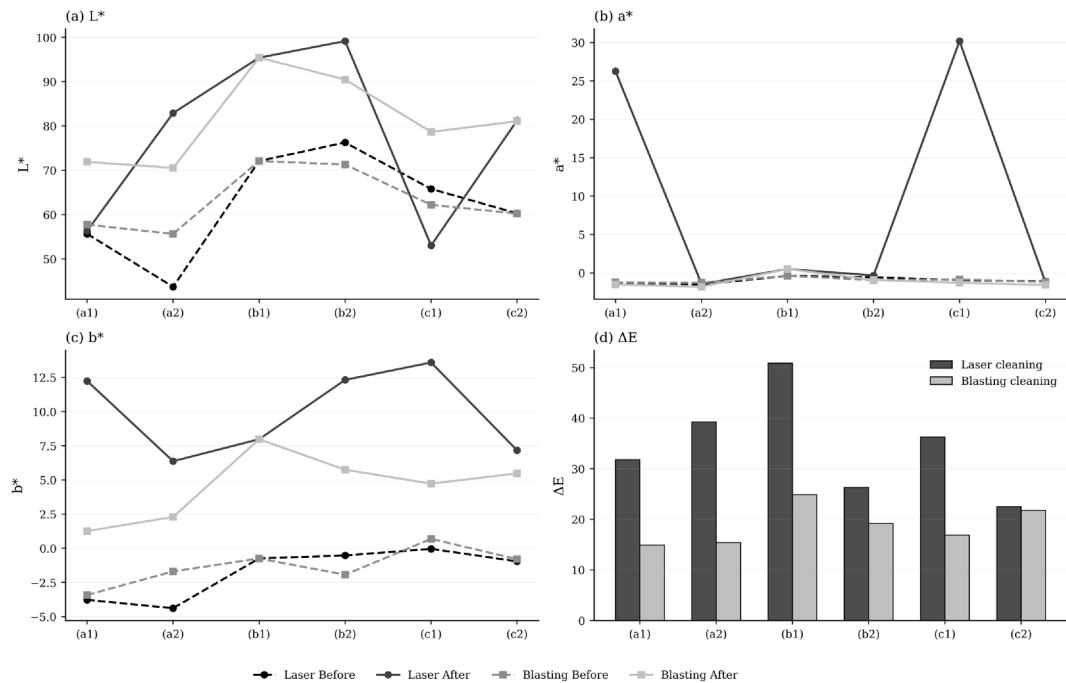


Fig. 4. Changes in L^* , a^* , b^* , and ΔE values after laser and blasting cleaning of paint-contaminated stone specimens.

상관관계가 확인되었다. 반면 블라스팅 세척에서는 시편별로 높이 변화 양상이 다양하게 나타났으나 ΔE 값은 비교적 안정적인 범위를 유지하였으며, 두 변수 간 뚜렷한 상관성은 확인되지 않았다.

4. 결론

본 연구에서는 사암, 화강암 및 섬록암 시편에 적색 및 흑색 페인트 오염을 인위적으로 조성한 후, 레이저 세척과 블라스팅 세척을 적용하여 세척 이후 나타나는 표면 형상 변화와 색상 변화를 비교·분석하였다. 디지털현미경 관찰, 3D 표면 형상 분석 및 색차 분석을 종합한 결과, 세척 반응은 세척기법뿐 아니라 암석 재질과 오염물의 색상에도 따라 서로 다른 양상으로 나타났다.

레이저 세척에서는 흑색 페인트 오염 시편이 적색 페인트 오염 시편보다 잔존 오염물이 적게 관찰되었으며, 적색 오염 화강암(b1)과 섬록암(c1)에서는 높은 variation과 ΔE 값이 함께 나타났다. 또한 ΔE 와 mean height variation 간에는 비교적 높은 양의 상관성이 확인되어, 레이저 세척에서는 색상 변화와 표면

형상 변화가 함께 나타나는 경향을 확인하였다. 이는 레이저 세척이 오염물의 광학적 특성에 영향을 받으며, 적색과 흑색 페인트가 서로 다른 세척 반응을 보일 수 있음을 시사한다.

반면 블라스팅 세척에서는 시편별로 높이 변화의 증가와 감소가 혼재되어 나타났으며, 흑색 오염 사암(a2)은 가장 높은 variation을 보인 반면 적색 오염 사암(a1)과 흑색 오염 화강암(b2)에서는 높이 감소가 나타났다. 그러나 ΔE 값은 대부분 14.9~24.9 범위의 비교적 안정적인 수준을 유지하였으며, ΔE 와 mean height variation 사이의 뚜렷한 상관성은 확인되지 않았다. 이는 블라스팅 세척에서는 색상 변화와 표면 형상 변화가 반드시 동일한 경향으로 나타나지 않음을 의미하며, 연마재의 물리적 충돌과 암석 조직 특성이 복합적으로 작용한 결과로 사료된다.

종합적으로 레이저 세척은 적색 페인트 오염 화강암과 섬록암에서 색차(ΔE)와 표면 형상 변화가 동시에 크게 나타나 오염물의 광학적 특성에 따른 영향을 크게 받는 것으로 확인되었다. 반면 블라스팅 세척은 색상 변화는 비교적 안정적인 범위를 유지하였으나, 표면 형상 변

화는 암석 재질에 따라 서로 다른 양상을 나타냈다. 특히 화강암과 섬록암에서는 블라스팅 세척이 레이저 세척에 비해 상대적으로 안정적인 표면 변화 양상을 보인 반면, 사암은 두 세척기법 모두에서 표면 변화의 편차가 크게 나타나 암석의 조직 특성과 오염물 특성을 함께 고려한 세척기법 선정이 필요한 것으로 판단된다.

이러한 결과는 석조문화유산의 암종별 특성을 고려한 맞춤형 세척기법 선정과 보존처리 기준 마련을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 향후에는 다양한 안료 성분과 세척 조건을 적용한 비교 연구 및 Blank test를 통한 세척기법 자체의 영향 평가가 이루어진다면, 석조문화유산 세척기법의 적용 기준 마련에 보다 객관적인 근거를 제시할 수 있을 것이다.

REFERENCES

- Cultural Heritage Administration, 2024, Announcement of measures to strengthen national heritage management related to Gyeongbokgung Palace wall damage, Daejeon, Korea, <https://www.khs.go.kr>
- Cultural Heritage Administration, 2026, Cultural heritages in statistics 2025, Daejeon, Korea, https://www.cha.go.kr/cop/bbs/selectBoardList.do?bbsId=BB SMSTR_1020&mn=NS_03_07_04
- Jun, B. K., Han, M. S., Lee, J. J., Song, C. Y., 2006, Present state and statistical analysis of stone cultural heritage by national appointment in Republic of Korea, Conservation Science Studies, 27, 43-61, <https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchArticle.do?cn=JAKO200664064984389>
- Kim, J. H., 2003, A Study on elimination of contaminants used by the laser for the 10 storied-pagoda in the temple of Kyoungchunsa, M.A. thesis, Gyeongju Univ., Gyeongju, Korea, <https://www.riss.kr/link?id=T9003554>
- Kim, J. H., Kim, S. D., Kang, D. I., 2002, A Study on removing of pollutants on the 10-storied-pagoda in the temple of Kyoungchunsa-To focus on elimination of contaminants used by the laser for the 10 storied-pagoda in the temple of Kyoungchunsa, 23, 41-57, <https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchArticle.do?cn=JAKO200264064939921>
- Kim, J. H., Lee, M. S., 2018, A Study on the representation experiment for a proposed conservation technique - focused on removing surface stains of Myazedi quadrilingual stone of Myanmar -, J. Conserv. Sci., 34(6), 525-538.
- Kim, Y. T., Lee, Y. W., Jo, S. N., Lee, J. M., 2020, The case study on the conservation of three-storied stone pagoda at Nakseongdae, Conservation Science in Museum, 23, 31-48.
- Ko, G. Y., 2024, The case study on the conservation of three-storied stone pagoda at Nakseongdae, Conservation Science in Museum, 23, 31-48, M.A. thesis, Myongji Univ., Seoul, Korea, <https://doi.org/10.22790/conservation.2020.23.0031>
- Lee, H. Y., Wu, K. C., 2025, A Comparative study of cleaning methods for the conservation of Korean War identification tags, J. Conserv. Sci., 41(3), 502-510.
- Lee, J. M., 2001, Laser cleaning technology in the restoration of artworks, J. Conserv. Sci., 10(1), 10-20, <https://www.earticle.net/Article/A142346>
- Lee, J. W., Ham, C. H., Kim, S. D., Lee, C. H., 2009, Removal methods of paint pollutants on the stone cultural heritage using poultices, J. Conserv. Sci., 25(4), 421-430.
- National Research Institute of Cultural Heritage, 2011a, Cleaning and surface contaminant of stone cultural heritage, Daejeon, Korea, https://portal.nrich.go.kr/kor/originalUsrView.do?menuIdx=1046&info_idx=482
- National Research Institute of Cultural Heritage, 2011b, Restoration scheme for material loss and rock properties of stone cultural heritage, Daejeon, Korea, https://portal.nrich.go.kr/kor/originalUsrView.do?menuIdx=1046&info_idx=481
- Shon, B. H., 2010, Formation of salty materials on granite surface by environmental pollutants - effects of TiO₂ -, JKAI, 11(5), 1754-1759.

-
- Graduate student. Ga-Young Ko
Department of Conservation of Cultural Property,
Myongji University
koga9921@gmail.com
 - Graduate student. Min-Seo Ko
Department of Cultural Properties, Chung-Ang
University
kms011230@naver.com